

Вулканизм — есть основной процесс дегазации мантии. В связи с вулканическими извержениями в условиях поверхности Земли из магмы, зарождающейся на глубинах 150-200 км (Мархинин, 1967), высвобождаются значительные объемы магматического газа. Накопление компонентов этого газа на земной поверхности и их химическая эволюция в течение геологической истории Земли привели в конечном итоге к формированию на ней водной и воздушной оболочек и к возникновению жизни. С поступлением магматических газов на поверхность Земли и в приповерхностные слои земной коры связано образование многих полезных ископаемых как рудных, так и нерудных. Таким образом, важность изучения магматических газов очевидна. Однако отбор проб собственно магматического газа, являющийся первым этапом исследований, связан с исключительными трудностями, и до сих пор известны лишь единичные случаи отбора таких проб.

В мае 1912 г. А. Дей и И. Шеферд, сотрудники географической лаборатории Института Карнеги, ввели железную трубку в лавовый пузырь, образовавшийся на лавовом озере в кратере Халемаумау вулкана Килауэа на о. Гавайи (Day, Shepherd, 1913). Они показали, что магматический газ содержит до 70% воды, наличие которой оспаривалось в то время. Но результаты анализа взятой пробы оказались не вполне удовлетворительными. Железная трубка, которой отбиралась проба, искажала истинный состав газа. Не исключалось загрязнение атмосферным воздухом. В 1917 г. Шеферд успешно отобрал несколько проб с поверхности оз. Халемаумау. Более представительные пробы собрал в 1919 г. Т. Джаггар все из того же оз. Халемаумау (Jagggar, 1940). В 1926 г. на Мауна-Лоа (о. Гавайи) Шеферд опять отобрал пробы газа из жидкой лавы (Shepherd, 1938). В 1959 г. М. Шенью, Г. Тазиев и Р. Фабр взяли газ из лавового озера вулкана Ни-

Таблица 1

Состав вулканических газов, об. %

Компоненты	1	2	3	4	5
CO ₂	21,4	46,2	40,9	4,6	18,2
CO	0,8	0,4	2,4	0,3	0,3
H ₂	0,9	0,016	0,8	2,8	10,4
SO ₂	11,5	7,6	4,4	4,1	21,7
S	0,7	0,0	—	—	—
SO ₃	1,8	20,6	—	—	—
Cl ₂	0,1	0,0	—	—	—
F ₂	0,0	0,0	—	—	—
O ₂	0,0	0,0	—	—	—
HCl	—	—	—	0,6	—
N ₂ + редкие	10,1	8,8	8,3	4,5	47,5
CH ₄	—	—	—	—	0,7
H ₂ O	52,7	38,0	43,2	83,1	?

Примечание: 1 — Килауэа, о. Гавайи; среднее значение 10 проб газа из лавового оз. Халемаумау, взятых Т. Джаггаром в 1917-1919 гг.; 2 — Мауна-Лоа, о. Гавайи; среднее значение 2 проб из расплавленной лавы, взятых Шефердом в 1926 г.; 3 — Нирагонго, Африка; проба из лавового озера, взятая М. Шенью, и Г. Тазиевым в 1959 г.; 4 — Суртсей, Исландия; среднее значение 11 проб из жидкой лавы, взятых Дж. Сигвалдсоном в 1967 г.; 5 — Этна, Сицилия; среднее значение 2 проб из жидкой лавы, взятых М. Шенью в 1961 г.

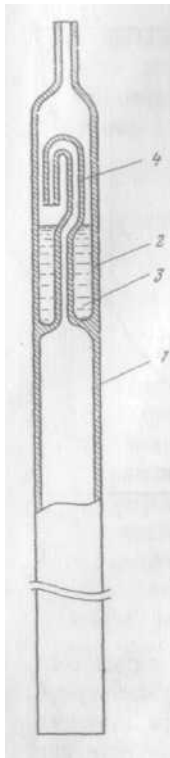
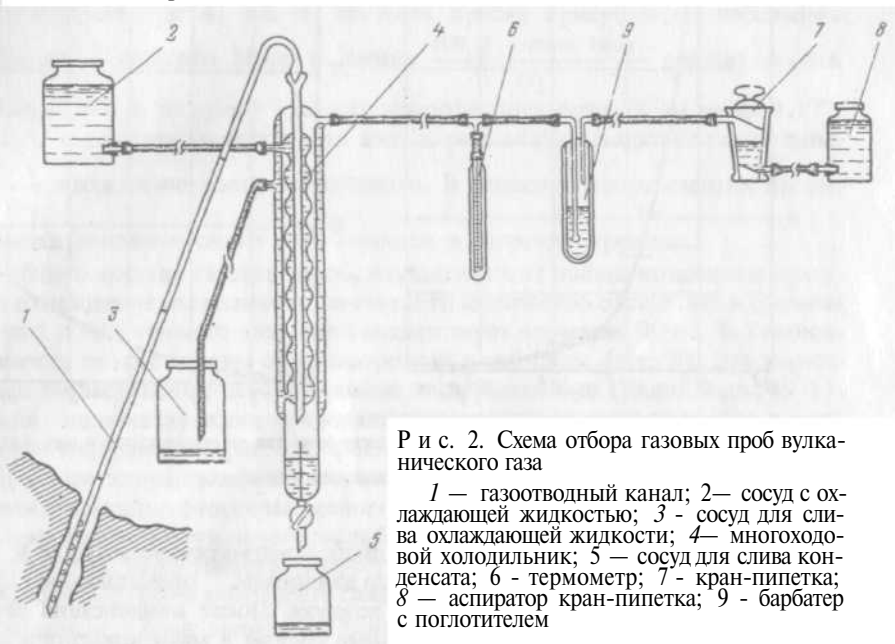


Рис. 1. Газоотводный канал для отбора высокотемпературного магматического газа

1 — кварцевая трубка; 2 — конденсатоотборник; 3 — конденсат; 4 — капилляр конденсатоотборника



Р и с. 2. Схема отбора газовых проб вулканического газа

1 — газоотводный канал; 2 — сосуд с охлаждающей жидкостью; 3 — сосуд для слива охлаждающей жидкости; 4 — многоходовой холодильник; 5 — сосуд для слива конденсата; 6 — термометр; 7 — кран-пипетка; 8 — аспиратор кран-пипетка; 9 — барбатор с поглотителем

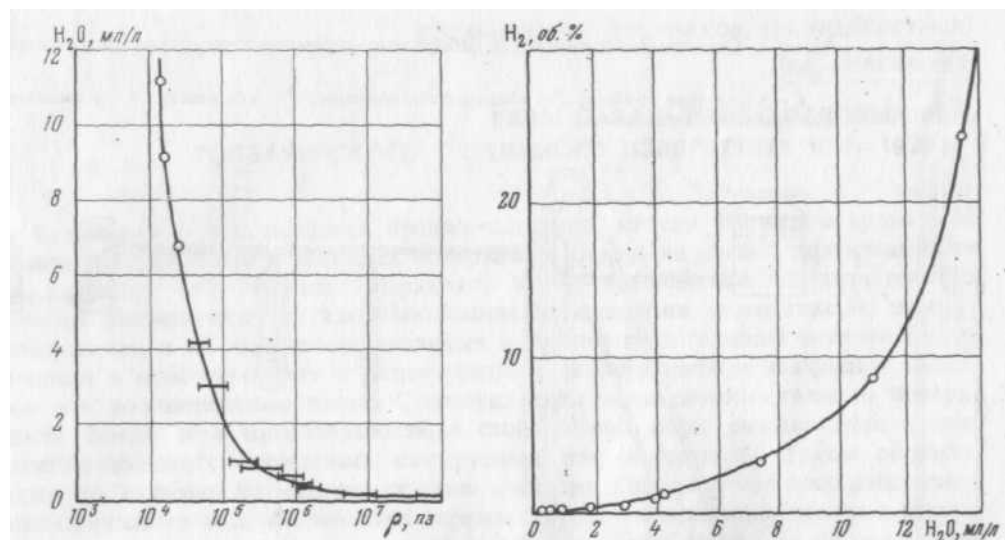
рагонго в Африке (Chaigneau et al., 1960), погрузив отборную трубку на 15 см в раскаленную лаву. Из истоков лавовых потоков газы впервые отобраны М. Шенье в 1961 г. при извержении вулкана Этны. Он брал пробы газа, вводя в расплавленную лаву металлическую трубку (Chaigneau, 1962). В период 1964—1967 гг. при извержении вулкана Суртсэй в Исландии было отобрано более десятка газовых проб из жидких текущих лав Дж. Сигвалдесеном и Дж. Элиссоном (Sigvaldason, Elisson, 1968).

Примеры анализов наиболее представительных проб, отобранных зарубежными учеными, сведены в табл. 1.

В Советском Союзе отобрать пробы магматического газа непосредственно из лавовых рек, из их истоков и в их среднем течении впервые удалось Е.К. Мархинину и В.А. Уракову в 1975—1976 гг. на Южном прорыве Большого трещинного Толбачинского извержения.

Отборные трубки из керамики, металла (из нержавеющей стали, из титана, из ванадия), а позже из кварцевого стекла (это наиболее удачный вариант) различной длины — от 1,5 до 4 м погружались в текущую жидкую лаву на глубину 10—50 см. В отдельных случаях были отобраны пробы газа из только что появившихся на поверхности лавового потока пузырей, вздутых магматическим газом. Лава имела ячеистую структуру, магматический газ концентрировался в ее порах-пузырьках. Попадая в газовую пору, отверстие отборной трубки не забивалось лавой. Видимо, в месте соприкосновения трубки и лавы создавался перепад давления, который усиливал приток газовых пузырьков к трубке, а затем и в отборную систему. Температура лавы постоянно замерялась платино-платино-родиевой термопарой типа ПП-1 и была равна $1000 \pm 65^\circ\text{C}$.

Система отбора высокотемпературных газов состояла из специально сконструированного газоотводного канала (рис. 1), изготовленного из кварцевого стекла, многовыходного холодильника для конденсации паров магматического газа, термометра для замера температуры в системе подачи газа, бюреток с поглотителями компонентов, кран-пипетки либо сосудов для отбора газов, аспиратора кран-пипетки либо насоса в зависимости от цели отбора газа (рис. 2). Перед



отбором система неоднократно промывалась магматическим газом и, кроме того, газ, как правило, входил в систему под давлением, превышающим атмосферное, что исключало подсос атмосферного воздуха. После конденсации пара, содержащегося в газе, газ собирали в специальные сосуды и анализировали в лаборатории. При хранении газа принимались всевозможные меры против загрязнения его атмосферным воздухом.

Газ анализировали на хроматографе ЛХМ-8МД (модель V и Луч). Условия хроматографирования на хроматографе ЛХМ-8МД: газ-носитель — гелий, неподвижная фаза — поропак, температура колонок — 60°C , длина — 3 м, детектор — катарометр. На хроматографе Луч: газ-носитель — аргон, неподвижная фаза — молекулярные сита 5А, температура колонок — 80°C , длина — 3 м, детектор — катарометр.

Результаты анализа газа, полученные при обработке 36 проб, следующие (об. %) : H_2 - 0,002-25,5; O_2 - 0,6-19,7; N_2 - 38,6-83,4; $He + Ne$ - 0,02-0,17; CO_2 - 0,2-41,0; CO - 0,06; CH_4 и другие углеводороды - 10^5 - 0,56; HF - 0,005-0,06; HCl - 0,05-0,7; SO_2 - 0,002-0,006; H_2S - 0,003-0,008 (аналитики С.П. Левшунова и Р.В. Гусева).

Таблица 2

Углеводородный состав магматического газа

Проба	Групповой углеводородный состав, об. %					
	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_3H_8	C_3H_6	iC_4H_{10}
Магматический газ	66,17	2,56	4,06	2,10	6,39	1,28
из жидких лав						
То же	41,33	8,98	21,56	4,49	10,78	0,52
"	33,45	4,49	15,30	28,85	4,77	0,86
Остывшая лава из	71,93	12,42	9,34	2,74	2,30	0,04
жидкого потока						
То же	61,29	12,88	15,07	3,27	2,62	0,20
"	69,40	6,94	14,90	2,25	2,04	0,12
Шлаковая бомба	55,37	5,70	25,00	3,50	3,80	0,34
Аналитик С.П. Левшунова						

В составе газа, взятого из жидкой лавы Толбачинских извержений, обращает на себя внимание низкое содержание окиси углерода по сравнению с пробами, отобранными зарубежными исследователями. Количество углекислого газа колеблется в пределах до 41 об. %. Во всех пробах присутствуют небольшие

количества гелия. Показатель Мура и Лепапа

$$\frac{100 \times \text{редкие газы}}{N_2}$$

составляет для

средней пробы 0,547, в то время как для атмосферного воздуха он равен 1,177. Следовательно, можно предполагать, что азот и редкие газы в пробах ювенильны.

Отношение $\frac{N_2}{O_2}$

значительно выше воздушного. В зависимости от степени дегаза-

ции лавы состав магматического газа менялся в больших пределах.

Помимо общего состава газовых проб, изучался также состав конденсата, полученного при охлаждении магматического газа. Его количество составляет в среднем до 11,2 мл на 1 л откачанного газа, что соответствует примерно 90 об. %. Установлена зависимость вязкости лавы от растворенной в ней воды (рис. 3). Эта зависимость хорошо согласуется и с лабораторными экспериментами (Кадик и др., 1971).

Корреляция количества сконденсированного пара и содержания водорода в магматическом газе изображена на рис. 4. В пробах конденсата магматического газа определяли ионы фтора, хлора, сульфата и металлов. При определении фтора прямой потенциметрией с помощью фторселективного электрода из фтористого лантана после подщелачивания было обнаружено его лишь 660 мг/л. При добавлении в раствор комплексообразователей было обнаружено фтора уже 199 мг/л. Это говорит о том, что приблизительно 60% фтора в конденсате связано в комплексе с металлами.

Хлор определяли двумя методами: прямой потенциметрией электродом из хлорида серебра и argentометрическим титрованием. Оба метода дали очень высокое содержание хлора — до 23800 мг/л конденсата.

Металлы в конденсате определяли методом атомной абсорбции на спектрофотометре С—302 в пламени воздух—ацетилен.

Получены следующие усредненные результаты анализа конденсата при pH 0,66–0,85; H₂O - 11200 мг/л газа в мг/л: Cl - 23800; F - 1900; SO₄²⁻ 220,4; H₂SO₄ - 1327,3; NH₄⁺ - 6,2; Na⁺ - 770,0; Al³⁺ - 250,6; Zn²⁺ - 190,3; Cu₊₂ - 93,5; Ca²⁺ - 68,0; Fe²⁺ - 37,5; Mg²⁺ - 183; Cd²⁺ - 24,79; Li⁺ - 1,5; Pb - 1,41; Mn²⁺ - 1,23; Sn²⁺ - 0,05; As²⁺ - 0,05; Ag²⁺ - 0,001; Co²⁺ - следы.

Анализ показал, таким образом, что основным компонентом вулканических эманаций является вода. Практически во всех пробах присутствуют высокие концентрации цинка, меди, кадмия, причем в некоторых случаях эти элементы преобладают над породообразующими. Весьма интересно также то, что в пробах

Групповой углеводородный состав, об. %

nC ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	iC ₅ H ₁₂	nC ₆ H ₁₂	iC ₆ H ₁₄	nC ₆ H ₁₄	nC ₆ H ₁₆	Σ
3,01	3,16	Сл.	Сл.	Σ 11; 28		—	100,00
2,25	1,17	5,75	1,08	Σ 2,08		—	99,98
2,06	6,68	0,81	3,81	Σ 2,86		—	101,01
0,23	0,25	0,09	0,09	0,15	0,34	0,08	100,00
1,28	2,18	0,15	0,22	0,50	0,28	0,06	100,00
0,66	1,40	0,16	0,20	1,26	0,36	0,37	100,06
1,90	3,30	0,44	0,53	Σ 0,12		—	100,00

обнаружено относительно мало калия и его содержание близко к содержанию лития. Сравнительно незначительно содержание в конденсате магния и кальция. В общем можно сказать, что магматическими газами выделяются относительно незначительные количества петрогенных элементов (за исключением натрия) при высоких содержаниях рудных элементов.

Помимо общего анализа был также проведен более детальный анализ углеводородной части магматического газа методом газовой хроматографии. Полученные при этом результаты по определению группового углеводородного состава магматического газа представлены в табл. 2. В углеводородной части газа преимущественное положение занимают метан и его гомологи до гексана и выше. Кроме того, присутствуют углеводороды непредельного характера (этилен, пропилен, бутилен и др.). Последнее обстоятельство позволяет предполагать протекание процессов термического крекинга углеводородов. Обнаружена прямая зависимость между содержанием водорода и гаммой углеводородов в магматическом газе. Этот факт говорит в пользу абиогенного происхождения магматических углеводородов.

При отборе газа и конденсата из лавовых речек отбирали также образцы лав, вулканических бомб, пепла, в которых определяли углеводородный состав газов, адсорбированных вулканическими продуктами.

Результаты анализа этих газов представлены в той же табл. 2. В углеводородном составе газа твердых продуктов преимущественное положение занимает метан (порядка 70%). Кроме метана, обнаружен и ряд сложных углеводородов вплоть до C_6H_{14} и более тяжелых. Общее количество адсорбированных углеводородов составляет 0,08—0,3 $см^3$ на 1 кг лавы. Интересно отметить тождественность состава газов, отобранных из лавы и адсорбированных газов твердых продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

- Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И. Вода в магматических расплавах. М., "Наука", 1971. 268 с.
- Мархинин Е.К. Роль вулканизма в формировании земной коры. М., "Наука", 1967, 256 с.
- Chaigneau M. Sur le gaz volcaniques de l'Etna (Sidle). - Compt. rend, hebdomadaires des seances de l'Acad. des Sci., 1962, N 23, p.254.
- Chaigneau M., Tazieff H., Fabre R. Composition des gaz volcaniques du lac de lave permanent du Nyiragongo (Congo beige). — Compt. Rend. Acad. Sci. Paris, 1960, v. 250, pp. 2482-2485.
- Day A.L., Shepherd E.S. Water and volcanic activity. - Bull. Geol. Soc. Am., 1913, v. 24, 573p.
- Elskens L, Tazieff H., Tonani E, A new method for volcanic gas analysis in the field. — Bull. Volcanol., 1964, Ser. 2, t. 27, p. 347-350.
- Jaggat T.A. Magmatic gases. - Am. J. Sci. 1940, v. 238, p. 313-353.
- Sigvaldason G.E., Elisson G. Collection and analysis of volcanic gases at Surtsey, Iceland. - Geochim. Cosmochim. Acta, 1968, v. 32, p. 797-805.
- Shepherd E.S. The gases in rock and some related problems. - Am. J. Sci., 1938, Ser. 5, V.35-A, p. 311-351.